第 41 卷 第 6 期
2024 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1428-08

鞋带松紧度和位置对跑步时鞋带拉力的影响

汤运启[1],李灵君[1],魏书涛[2],晏彪[3],郭新宇[1],张翠[4,5]

(1. 陕西科技大学设计与艺术学院,710021 西安;2. 三六一度(中国)有限公司,361009 厦门;3. 上海逢友信息科技有限公司,200120 上海; 4. 山东体育学院研究生院,250014 济南;5. 山东省体育科学研究中心,250014 济南)

摘　要:通过研究不同鞋带松紧程度下不同位置的鞋带在跑步过程中的拉力变化规律,为跑鞋鞋带自动束紧系统的研发提供数据支撑。使用三维运动捕捉系统、测力台以及自主研制的微型鞋带拉力传感器,采集 15 名男性跑者在不同鞋带松紧(松弛、舒适、紧绷)状态下,以 3.8 m/s 速度跑步时,不同位置(前、中、后)的鞋带拉力变化。研究表明:在鞋带松弛和紧绷的状态下,后部鞋带最大峰值拉力均大于前部和中部($P < 0.05$);在鞋带松弛状态下,前部、中部及后部最大峰值拉力分别出现在步态周期的(49.4 ± 14.6)%、(47.6 ± 9.9)%、(38.7 ± 16.7)%。而在鞋带舒适和紧绷状态下,前部鞋带最大峰值拉力出现于步态周期的(29.1 ± 11.8)%和(25.7 ± 6.6)%,中部鞋带拉力最大峰值出现于步态周期的(48.2 ± 9.2)%和(48.5 ± 12.1)%,后部鞋带拉力最大峰值出现于步态周期的(40.8 ± 18.9)%和(43.4 ± 15.7)%。跑步时鞋带拉力随步态周期各个时段呈规律性变化,且后部的鞋带拉力最大。建议未来跑鞋设计时应针对鞋带部位进行分区设计,以提高跑步运动时的舒适性和运动表现。

关键词:跑鞋;鞋带松紧度;鞋带拉力;自动系带装置

中图分类号:G804.6　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.024

Effect of shoelace tightness and position on shoelace tension force during running

TANG Yunqi[1], LI Lingjun[1], WEI Shutao[2], YAN Biao[3], GUO Xinyu[1], ZHANG Cui[4,5]

(1. College of Art and Design, Shaanxi University of Science & Technology, 710021 Xi'an, China; 2. 361° (China) CO. Ltd., 361009 Xiamen, China; 3. Shanghai Fedutech Co., Ltd., 200120 Shanghai, China; 4. Graduate School of Shandong Physical Education University, 250014 Jinan, China; 5. Sport Bomechanics Lab, Shandong Institute of Sports Science, 250014 Jinan, China)

Abstract: This study aimed to explore the distribution pattern of shoelaces tension in different positions under different shoelaces tightness during running. It would provide data support to design automatic shoelaces tightening system for running shoes. A three-dimensional motion capture system and a self-developed miniature shoelace tensile testing system were used to collect the shoelace tension force. Fifteen male runners participated in this study. Shoelace tension forces in different positions (front/middle/rear) were collected when running at 3.8 m/s speed under different conditions (loose/comfortable/tight). Results

收稿日期:2022-09-25　　**修回日期**:2022-12-05
基金项目:国家重点研发计划"科技冬奥"重点专项(No. 2020YFF0303800);福建省科技厅区域发展研发项目(No. 2020H4016)
通信作者:魏书涛。E-mail:st.wei@361sport.com
引用格式:汤运启,李灵君,魏书涛,等. 鞋带松紧度和位置对跑步时鞋带拉力的影响[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1428-1435.
TANG Yunqi, LI Lingjun, WEI Shutao, et al. Effect of shoelace tightness and position on shoelace tension force during running[J]. Chinese journal of apllied mechanics, 2024, 41(6):1428-1435.

showed that the peak shoelace tension of the front shoelace was greater than that of the front and middle ($P<0.05$) when the shoelace was loose and tight. At the loose state, the peak tension force of the front, middle, and rear shoelace appeared in the gait cycle of $(49.4 \pm 14.6)\%$, $(47.6 \pm 9.9)\%$, and $(38.7 \pm 16.7)\%$, respectively. The peak tension force of the front shoelace appeared in $(29.1 \pm 11.8)\%$ and $(25.7 \pm 6.6)\%$; the middle shoelace appeared in $(48.2 \pm 9.2)\%$ and $(48.5 \pm 12.1)\%$; and that of the rear shoelace appeared in $(40.8 \pm 18.9)\%$ and $(43.4 \pm 15.7)\%$ of the gait cycle when the shoelace was in the state of comfort and tight. The shoelace tension changed regularly with each period of the gait cycle during running, and the rear shoelace tension force was the largest. It is suggested that the regional design of shoelaces should be carried out when designing running shoes to improve the comfortableness and running performance of the athlete.

Key words: running shoes; tightness of shoelaces; shoelace tension; automatic lacing device

体育锻炼是保持健康和预防疾病的重要方式之一,随着全民健身时代的到来,跑步作为一种常见的体育运动方式,由于其对装备和场地要求较低,受到越来越多人的欢迎[1]。跑鞋是跑步运动中的重要装备,在减少运动损伤提高运动表现方面发挥着十分重要的作用。其中鞋带是跑鞋结构中非常重要的组成部分[2],调节鞋带的松紧可以改变足与鞋的耦合[3],提高鞋帮对足部的包裹作用和穿着舒适度[4],进而影响足部控制能力[5]。

鞋带影响足部控制能力的可控变量是鞋带的松紧程度[6]与系带方式[7]。目前有关鞋带松紧度对足部生物力学的研究多集中在对足底及足背压力等的影响方面。研究表明,当鞋带过紧时,会导致足背部压强过大,导致足部损伤风险增加[7];而鞋带过松时,足部在鞋腔内前后滑动显著增加,会显著影响跑者的跑步表现。也有研究指出限制支撑期过度旋前和舟骨下降会对跑者有一些潜在好处[8],能降低下肢损伤的风险。因此确保跑者运动过程中的鞋带松紧度切合实际需求,会更有利于跑鞋性能的发挥,进而影响跑者的跑步表现[9]。

跑步过程中跑鞋对地面的反复冲击和腿的来回摆动会导致鞋带在运动过程中松解[10],松解的鞋带可能会被着地时的另一只脚踩中,继而引发绊倒并产生严重的运动损伤。为了规避鞋带松解带来的损伤风险,提高运动表现,通常采用重复打结的方式来实现,但效果不佳。于是,国内外众多制鞋厂商推出多种自动系带装置来替换传统的鞋带,如 Xtenex 和 Lock laces 鞋带系统,它们的最终目标都是使鞋带保持设定好的松紧程度不发生变化。但是跑步运动过程中足部的形态会随着着地姿态和负重情况动态变化,且足部的不同位置(如前足、中足和后足)形变程度不一。而自动系带装置仅能固定鞋带长度,足部形态变化可能会引起不同位置的鞋带拉力产生相应改变。

现阶段由于研究手段的限制,鞋带的松紧程度大多通过人体的主观感受来描述[3]。为解决量化鞋带拉力的问题,本研究团队基于微型拉力传感器研发了一种鞋带拉力采集系统,且该系统的精度和重复性已经过验证,可以满足鞋带拉力的采集要求[11]。在跑步相关的研究领域,目前尚没有跑步运动过程中跑鞋鞋带拉力变化的相关报道。而了解跑步运动过程中鞋带拉力的变化规律,可以直观反映帮面松紧度对运动员的表现和感知的影响,对于自动化智能控制鞋带束紧装置的设计将具有指导意义。

因此,本研究拟通过自制鞋带拉力采集系统量化鞋带松紧度,监测不同鞋带松紧度状态下运动时鞋带拉力分布及其变化趋势,以期为跑者选择智能可穿戴跑鞋提供参考依据,为鞋类制造商开发智能运动鞋产品提供数据参考。

1　研究方法

1.1　研究对象

采用 G * Power(version 3.1.9.2)进行样本量估算,统计方法选择单因素重复测量方差分析,显著性水平 $\alpha=0.05$,效应量 $f=0.36$(预实验结果),为达到 80% 的统计功效,计算得到的最小样本量为 14 人。为达到更高统计功效,本研究最终随机招募了 15 名男性跑步爱好者参与本研究:年龄(20.6 ± 5.9)岁,身高(1.75 ± 3.0)m,体质量(66.5 ± 2.8)kg,体质量指数(body mass index, BMI)$(21.8 \pm 1.0)\mathrm{kg/m^2}$。纳

入标准:每周跑步训练≥10 km;所穿鞋码为欧码 41 码;BMI在 18 ~25 kg/m^{2}之间;习惯以足跟着地方式跑步;无神经肌肉、前庭和视觉系统疾病。排除标准:下肢及足部半年内有损伤史;无法顺利完成测试的受试者。实验前告知受试者实验流程,所有受试者自愿参与本测试并签署知情同意书。

本研究假设:1)在不同鞋带松紧状态下跑步时鞋带拉力曲线的趋势不同;2)在跑步时前中后部位的鞋带拉力分布是均匀的。

1.2 测试仪器与材料

1.2.1 测试设备

1)自制微型鞋带拉力传感器及配套的数据采集系统(图 1),传感器的线性度与可重复性已经进行过检验,传感器的输出电压信号与载荷之间显著线性相关($P<0.000\,1$,$R^2=0.999\,9$),不同载荷下 3 个拉力传感器测量值变异系数的均值均小于 0.004,可重复性良好[11]。传感器的直径 10 mm,每只传感器的质量为 0.011 kg,总长度为 35 mm,精准度为0.01 N,量程 0 ~200 N。本次实验采样频率设为1 000 Hz。

2)三维运动捕捉系统:采用 Vicon(VICON Motion Systems,V8,Oxford Metrics Ltd.,Oxford,England)红外三维运动捕捉系统以及相配套的直径为 14 mm 红外反光标记点,利用数据采集软件 Vicon Nexus System(Vicon Nexus 2.6.7)采集跑步时受试者身上反光点的运动轨迹,采样频率为 200 Hz。

3)三维测力台:使用 Kistler(9287C,900 mm × 600 mm ×200 mm,Switzerland)三维测力台,采样频率为 1 000 Hz。

4)光电门测速系统:实验中受试者的跑步速度由光电门(Smart Speed PT Gate System,Fusion Sport,Germany)进行控制,测试过程中跑步速度的误差控制在 5% 以内。

1.2.2 测试用鞋

选用普通跑鞋(质量:190 g;鞋码:欧码 41;ART NO. 572022241-5,三六一度中国有限公司),该鞋有 7 对鞋孔。将跑鞋上原有鞋带替换为内芯为钢丝的鞋带作为测试鞋带,以减小测试过程中鞋带材料延伸性导致的鞋带拉力误差。系带方式采用大众最为常用的 X 系带方式[12],3 个鞋带拉力传感器分别放置于第一与第二、第三与第四、第五与第六鞋带孔之间(图 1),分别对应足背的前、中、后 3 个部位。同时在鞋带上使用旋扣式自动系带系统,鞋带的自由端使用自动系带系统的旋扣进行固定,此系带系统可以通过机械结构调节鞋带松紧(图 1b),防止因系带造成的鞋带拉力变化或松脱。鞋带拉力传感器的数据采集盒通过数据线与传感器相连接,测试时调整数据线和数据采集盒的位置,确保不会影响受试者完成测试动作(图 1a)。

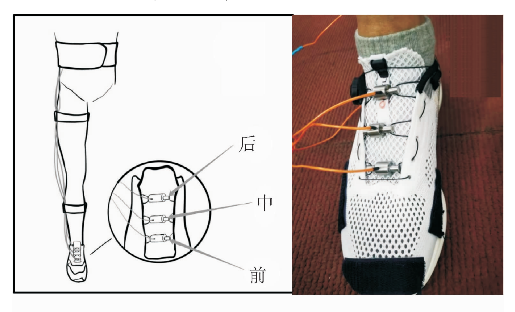


图 1 实验用鞋示意图

Fig. 1 Running shoes used in this study

1.3 测试方案

测试前,受试者换上紧身衣裤、袜子和实验用鞋,告知其测试流程及动作,随后进行 5 min 的热身活动。之后根据下肢模型的贴点方法将 36 个直径为 14 mm 的反光标记点贴附于受试者骨性标志点的皮肤上[13]。测试时将鞋带设置为 3 种松紧状态,分别为松弛(在舒适状态的鞋带自由端长度延长 20%)、舒适(受试者感觉鞋带松紧合适)和紧绷(在舒适状态的鞋带拉力增大 10%)[14]。

测试开始时,实验人员为受试者随机选择设置一种鞋带松紧状态进行跑步测试。为了减少跑速对研究结果造成的可能影响[15],本研究要求受试者按规定的速度(3.8 ±5%) m/s[16]以后跟着地姿势跑步通过 40 m 长的跑道,在跑道的中点(距离起点约 20 m)安装有一块 Kistler 测力台。在测力台的两侧架设两组光电门,每侧光电门距离测力台中心位置均为1.5 m,以监测受试者的跑速。测试过程中跑速控制在(3.8 ±5%) m/s 范围内,测试状态自然无调整且右脚完整踩在测力台上,即为一次成功的测试。测试过程中均使用红外三维运动捕捉系统及三维测力台同步对受试者下肢运动学及动力学数据进行采集,同时通过外部触发方式使鞋带拉力采集系统与红外三维运动捕捉系统实现同步采集工作。要求每种条件成功采集 3 次有效数据用于后续数据处理与分析。

1.4 数据处理

本研究使用 Visual 3D(V6.0,C-motion Inc.,USA)进行数据处理,采用 Butter-worth 四阶低通滤

波器对三维运动学、测力台测得的动力学以及鞋带拉力数据进行滤波处理,截止频率分别设为 8、50、20 Hz[17]。鞋带拉力数据根据同步的运动学数据和三维测力台采集的动力学为基准截取一个完整步态周期的鞋带拉力数据进行处理分析。将右脚开始接触测力台(RON1)到右脚再次着地(RON2)定义为一个完整步态周期。具体地,以测力台测得的垂直地面反作用力连续 8 帧≥20 N 作为初次着地时刻(RON1),以垂直地面反作用力连续 8 帧≤20 N 作为支撑期结束时刻(ROFF),在此刻之后以贴在后跟上的 Marker 点(RFTK)垂直方向第一次到达最低点作为右脚再次着地时刻(RON2),RON1 和 RON2 之间的时间为一个完整的步态周期。其中 ROFF 为支撑期和摆动期的分界点。本研究分析指标为:鞋带最大峰值拉力 (peak shoelace tension force,PF),跑步时整个步态周期内的鞋带拉力最大值;最大峰值拉力到达时刻(time to peak shoelace tension force,TPF),为避免不同步态周期时间的差异对结果造成的影响,对该指标进行时间标准化处理,单位为% 步态周期。

1.5　统计分析

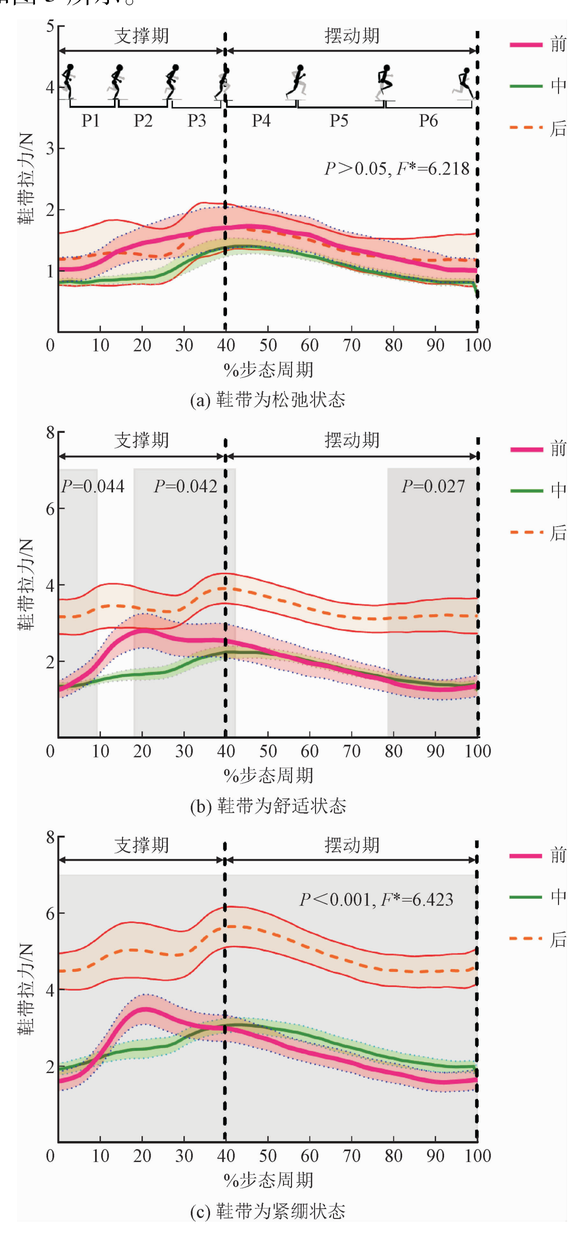
本研究使用统计参数映射(statistical parametric mapping,SPM)对跑步时右脚整个步态周期(右脚触地时刻到下一次右脚触地时刻)的一维鞋带拉力曲线进行统计分析。若整体具有显著性差异,采用事后配对 SPM t 检验来两两比较不同鞋带位置之间的拉力大小差异。$\alpha=0.05$ 时测定临界阈值 t。SPM 分析使用 spm1d 工具箱(http://www.spm1d.org)在 Matlab (R2018,The Mathworks,USA)中实现[18]。

本研究采用统计软件 SPSS 25.0 (IBMS,NY,USA)对各参数指标进行统计分析。对于鞋带拉力特征值,使用单因素重复测量方差分析检验不同鞋带松紧状态下,鞋带位置(前、中、后)对跑者跑步时鞋带拉力的影响,结果以平均值 ± 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,若方差分析具有显著性,则使用 Tukey's post-hoc 进行事后检验,显著性水平 α 设为 0.05。

2　结　果

2.1　不同位置鞋带拉力时间曲线变化趋势

SPM 分析结果显示,跑步时不同鞋带松紧状态下,仅舒适和紧绷状态下不同鞋带位置(前、中、后)的鞋带拉力曲线均存在显著性差异,跑步时跑鞋前、中、后部位的鞋带拉力分别在 3 种鞋带松紧状态(松弛、舒适、紧绷)下,整个步态周期的曲线趋势基本一致。后部鞋带拉力在整个步态周期呈现双峰曲线,前部及中部的拉力在整个步态周期均呈现先上升后下降的趋势(图 2),因此需要对每种鞋带松紧状态下,鞋带位置对鞋带拉力的影响进行事后检验,结果如图 3 所示。



注:SPM{F}即 F^*,灰色阴影代表统计映射分析有差异的部分;P1 为支撑早期;P2 为支撑中期;P3 为支撑末期;P4 为摆动初期;P5 为摆动中期;P6 为摆动末期[19-20]。

图 2　跑步时 3 种鞋带松紧状态下鞋带拉力变化曲线 SPM 分析

Fig. 2　SPM analysis of shoelace tension force-time curves under three kinds of shoelace tightness during running

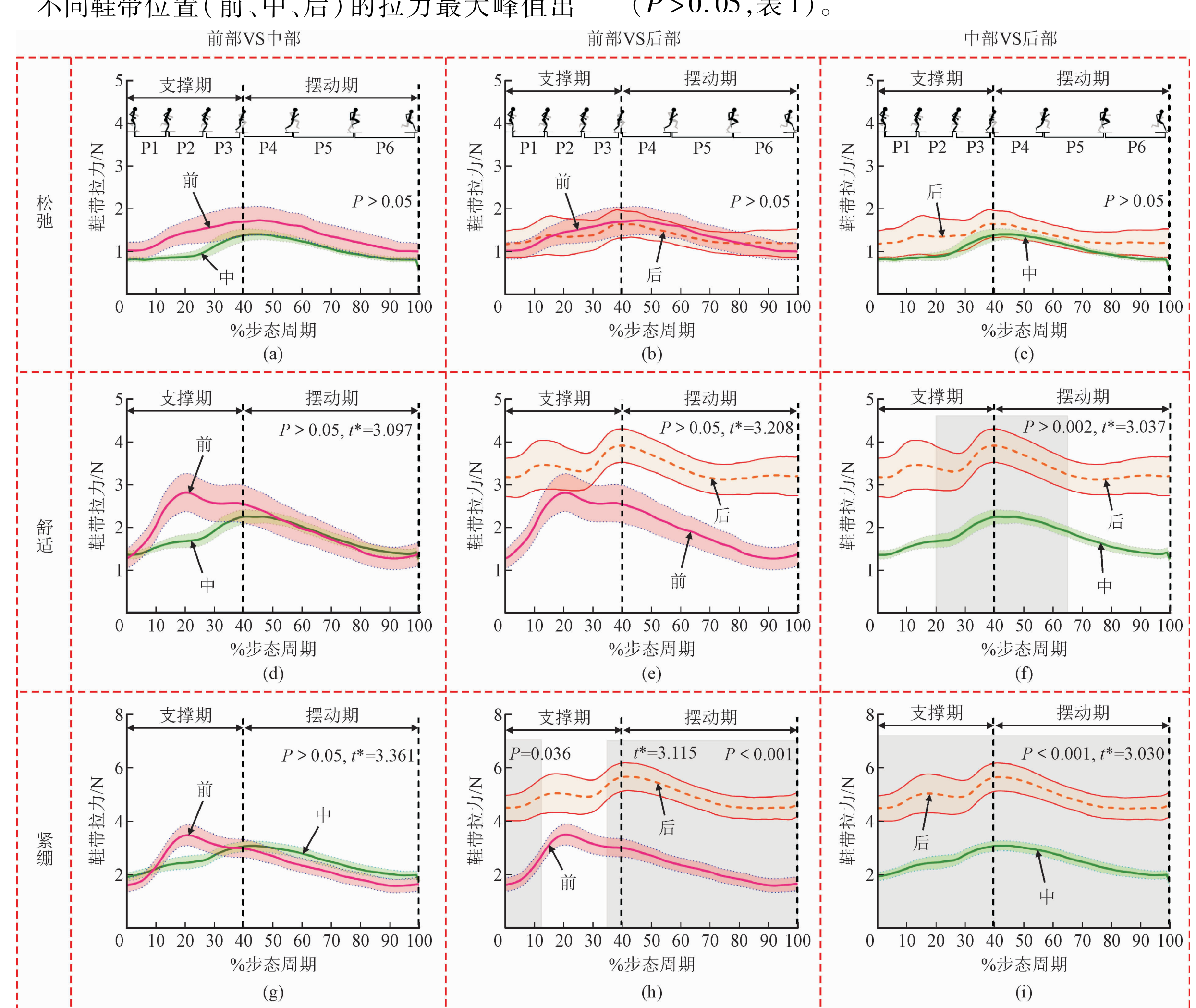
在鞋带松弛状态下跑步时，前中后部位鞋带拉力两两比较的结果在整个步态周期无显著性差异（图 3a）。在鞋带舒适状态下跑步时，与中部鞋带拉力相比，后部的鞋带拉力在步态周期的 20% ~65% 显著增大（$P=0.002$）（图 3f）。前部与中部/后部的鞋带拉力在整个步态周期无显著性差异（图 3d、图 3e）。

在鞋带紧绷状态下跑步时，与后部鞋带拉力相比，前部鞋带拉力在步态周期的 0 ~ 12%（$P=0.036$）、35% ~ 100%（$P<0.001$）显著减小（图 3h），中部鞋带拉力在整个步态周期也显著减小（$P<0.001$）（图 3i）。前部与中部的鞋带拉力在整个步态周期无显著性差异（图 3g）。

2.2 不同位置鞋带拉力特征值

不同鞋带位置（前、中、后）的拉力最大峰值出现时刻（TPF）在鞋带不同松紧状态下呈现不同的结果。鞋带舒适状态下，前部鞋带的 TPF（29.1% ± 11.8%）比中部（48.2% ±9.2%，$P<0.001$）和后部（40.8% ±18.9%，$P=0.013$）更早；紧绷状态下前部鞋带的 TPF（25.7% ±6.6%）比中部（48.5% ± 12.1%，$P<0.001$）和后部（43.4% ±15.7%，$P=0.001$）也更早。而在鞋带松弛状态下，不同鞋带位置之间的 TPF 无显著性差异（$P>0.05$，表 1）。

鞋带拉力特征值结果显示，在鞋带舒适状态下跑步时，后部鞋带的最大峰值拉力 PF（4.1 ±1.4 N）大于前部（3.1 ±1.6 N，$P=0.016$）和中部（2.5 ± 0.6 N，$P<0.001$），紧绷状态下跑步时，后部鞋带的 PF（5.7 ±1.9 N）也大于前部（3.8 ±1.4 N，$P<0.001$）和中部（3.2 ±0.7 N，$P<0.001$）。鞋带松弛状态下，不同位置鞋带之间的 PF 无显著性差异（$P>0.05$，表 1）。



注：SPM{t} 即 t^*，灰色阴影代表统计映射分析有差异的部分。P1 为支撑早期；P2 为支撑中期；P3 为支撑末期；P4 为摆动初期；P5 为摆动中期；P6 为摆动末期[18-19]。

图 3 跑步时不同松紧状态下鞋带不同位置的拉力时间曲线对比

Fig. 3 Comparison of shoelace tension force-time curves at different positions under different tightness conditions during running

表 1 跑步时不同松紧状态下鞋带不同位置的拉力特征值

Tab. 1 Characteristic values of shoelaces tension force at different positions under different tightness conditions during running

指标	鞋带松紧	鞋带位置			F	P
		前	中	后		
PF/N	松	1.9 ±1.1	1.5 ±0.6	1.8 ±1.1	1.158	0.328
	舒适	3.1 ±1.6	2.5 ±0.6	4.1 ±1.4 *#	13.450	<0.001
	紧致	3.8 ±1.4	3.2 ±0.7	5.7 ±1.9 *#	29.040	<0.001
TPF/%	松	49.4 ±14.6	47.6 ±9.9	38.7 ±16.7	3.057	0.074
	舒适	29.1 ±11.8	48.2 ±9.2 *	40.8 ±18.9 *	5.967	0.021
	紧绷	25.7 ±6.6	48.5 ±12.1 *	43.4 ±15.7 *	24.200	<0.001

注:“ * ”表示与前部相比差异具有统计学意义($P<0.05$);“ # ”表示与中部相比差异具有统计学意义($P<0.005$);PF 表示最大峰值拉力,TPF 表示最大峰值拉力出现时刻。

3 讨 论

本研究的目的是通过测量跑者在鞋带不同松紧状态下,不同位置(前、中、后)的鞋带拉力变化,探究跑者在整个步态周期内的鞋带拉力变化趋势。本研究发现,前、中、后部位的鞋带拉力分别在 3 种鞋带松紧(松弛、舒适、紧绷)状态下的曲线变化趋势基本一致,且跑步时不同位置的鞋带拉力并非均匀分布,下面将分别进行探讨。

本研究部分支持第一研究假设,在不同鞋带松紧状态下跑步时鞋带拉力在整个步态周期的变化趋势基本一致,后部鞋带拉力在整个步态周期呈现双峰曲线,前部及中部的拉力在整个步态周期均呈现先上升后下降的趋势。拉力特征值的结果表明,在鞋带舒适和紧绷状态下,跑步时跑者前部鞋带比中部和后部鞋带更早到达最大拉力峰值,这可能是由于跑步过程中,在步态周期的不同阶段,足部不同部位形变时间和形变量大小不同导致的。足部通常分为前掌(包括 5 块跖骨及 14 个趾骨)、中足(包括舟状骨、骰骨和 3 块楔状骨)、后足(包括跟骨和距骨)[21]等部分,这些部位分别对应鞋带的前、中、后部位。在支撑前期(P1)到支撑中期(P2)这一缓冲阶段,足部受到约 1.5 ~3 倍体质量的冲击力[22],足部从腾空状态至足部放平,触地时足部先后跟着地,转为中足着地,踝关节从背屈过渡至全足支撑期的跖屈,足底压力中心从足跟过渡到中足以及前掌位置[23],距下关节旋前,足纵弓高度下降,长度拉长以缓冲足部受到的冲击力[24]。这个过程中足纵弓产生纵向拉伸,后部鞋带在横向发生形变,同时前掌部位受力后足横弓被压缩,足底脂肪垫受到挤压也产生横向形变,根据朱晓兰等[25]的研究结果,在足宽度向上,足横弓对负重的变化较为敏感,容易因负载的增大而增宽,因此从腾空状态至着地状态,足部前掌部位产生的横向形变导致足跖围变大,使前脚掌宽度增大,进而挤压鞋面,由此使得前部鞋带所在的帮面受到拉伸,此时前部鞋带拉力到达最大峰值,而此时虽然后部鞋带也发生形变到达第一个峰值,但不是其最大峰值。从支撑后期(P3)末至摆动前期(P4)阶段,为了产生足够的推进力同时保证稳定性,踝关节跖屈角度增大,足底筋膜收紧,足内侧纵弓抬高[26],为推进力提供所需的稳定性和动力,踝关节跖屈角度继续增大,足带动鞋在鞋口部位产生较大的形变,因此后部和中部鞋带拉力出现最大峰值的时刻比前部更晚[27],这也是后部鞋带拉力出现第二个峰值的原因。由此也说明,后部鞋带由于足部负重形变导致的拉力变化小于由于蹬离动作导致的拉力变化。

鞋带松弛状态与鞋带舒适和紧绷状态下前部最大峰值拉力出现的时间不同,这可能是由于相比于鞋带松弛状态,鞋带舒适和紧绷状态下足与鞋之间的耦合更好[3],在跑步时足部形态变化会使鞋带迅速绷紧,在更短的时间内达到最大峰值,而鞋带松弛状态延长了力的传递时间。还有一种可能的解释是,鞋带松弛状态下,为了防止在摆动期(40% ~100% 步态周期)鞋子从脚上滑落,受试者增加了足底和脚趾的弯曲[7],此时前掌部位形变较大,由此导致松弛状态下前部鞋带拉力到达最大峰值的时间较晚。在鞋带松弛状态下,前、中、后部位鞋带拉力最大峰值出现基本出现于同一时间,可能是由于即使在支撑期(0 ~40% 步态周期),从足围度向上来看,负重状态的足跖围长(鞋带前部)相比于无负重状

态增大了 0.91%,前跗骨围长(鞋带中部)增大了 0.72%[28],但是鞋带松弛状态下,足与鞋之间有空隙,本研究推测这种足部形变对于鞋帮面产生拉力的幅度相比于摆动初期(40% ~50% 步态周期)脚带动鞋前进对帮面产生的拉伸力更小,因此鞋带松弛状态下,前、中、后部位鞋带拉力出现最大峰值拉力的时间一致,均出现在摆动初期。

本研究不支持第二研究假设,在不同鞋带松紧状态下跑步时,跑鞋不同部位的鞋带拉力不是均匀分布的,具体表现为后部的鞋带拉力大于中部和前部。RODGER[29] 指出跑步时支撑期(0 ~40% 步态周期)骨骼肌肉的形态变化产生了 3 个摇杆结构,在支撑后期(P3)末至摆动前期(P4),跖屈肌发力,跖趾关节背屈,形成一个以跖趾关节为支点的杠杆[30],此时横跗关节主要承担移动鞋的任务,所以鞋口部位在整个步态周期中运动中形态变化较大,故靠近鞋口部位的后部鞋带拉力大于中部和前部的鞋带拉力。

而在 3 种鞋带松紧状态下鞋带拉力在整个步态周期发生差异的时间不一致,如前所述,可能与跑步过程中随步态周期时间肌肉骨骼发生的形态变化有关。在鞋带松弛状态下,鞋面与足部之间的空隙增大,脚在鞋腔内会产生滑移,此时有可能增加运动损伤的风险[31]。鞋带舒适状态下,与中部的鞋带拉力相比,后部的鞋带拉力在步态周期的 20% ~65% 显著增大,这一结果与 HAGEN 等[7] 的研究结果相一致,HAGEN 的研究表明,在鞋带舒适状态下跑步时,足背后部的压力相比于足背其他部位的压力更大。有研究指出,鞋带越紧,意味着足与鞋更紧密的耦合[32],鞋带紧绷状态改变了足与鞋的耦合,增加了脚与鞋之间的接触面积,减少了后足的不稳定性[33],提高运动表现[3]。

本研究具有一定的局限性,实验中为了规避鞋带自身延展性对鞋带拉力的影响,采用内芯为钢丝的鞋带,未对其他材质的鞋带进行研究。本研究未使用双平面荧光透视成像技术对跑步过程中足部的解剖结构的动态变化进行验证,双平面荧光透视成像技术的优势主要在于通过 X 光透视成像和“2d ~3d 配准”技术,能够精确捕捉穿鞋状态下在体足部骨骼真实的运动,未来可尝试使用该技术对各种运动状态下鞋带拉力的变化进行更加深入的研究。实验中招募的受试者为业余男性跑者,鉴于不同人群跑步经验的差异以及性别差异,本实验结果应谨慎推广到其他的跑步群体。未来可以对传感器进行改良设计,扩大其对不同鞋带材料与系带方式的可使用范围,同时减少传感器本身对人体的影响,为开发智能鞋靴产品提供更为精细的数据支撑。

4 结 论

本研究结果表明,跑步过程中不同位置的鞋带拉力分布不均匀,后部鞋带拉力大于前部与中部。时相方面,前部鞋带拉力比中部和后部更早到达最大拉力峰值。建议未来在跑鞋设计时,前、中、后部位的鞋带分区设计,相互独立。同时在智能自动系带装置的设计中,考虑到鞋带拉力在整个步态周期的变化趋势,在运动过程中实时监控鞋带前、中、后部位的拉力变化并自动调整,使其保持在一个舒适的拉力值范围内,更符合足部在运动过程中的实际需求。

参考文献:

[1] KOOHSARI M J,SUGIYAMA T,LAMB K E,et al. Street connectivity and walking for transport: role of neighborhood destinations [J]. Preventive medicine,2014,66:118-122.

[2] HONG Y L,WANG L,LI J X,et al. Changes in running mechanics using conventional shoelace versus elastic shoe cover[J]. Journal of sports sciences,2011,29(4):373-379.

[3] HAGEN M,HENNIG E M. Effects of different shoe-lacing patterns on the biomechanics of running shoes[J]. Journal of sports sciences,2009,27(3):267-275.

[4] HOOGKAMER W,KIPP S,KRAM R. The biomechanics of competitive male runners in three marathon racing shoes: a randomized crossover study[J]. Sports medicine,2019,49(1):133-143.

[5] CZAPLICKI Z,RYLSKI A,SERWETA W,et al. Research on footwear laces with respect to abrasion resistance and spontaneous untying[J]. Fibres and textiles in Eastern Europe,2020,28(141):23-26.

[6] HERBAUT A,SIMONEAU-BUESSINGER E,BARBIER F,et al. A reliable measure of footwear upper comfort enabled by an innovative sock equipped with textile pressure sensors[J]. Ergonomics,2016,59(10):1327-1334.

[7] HAGEN M,HÖMME A K,UMLAUF T,et al. Effects of different shoe-lacing patterns on dorsal pressure distribution during running and perceived comfort[J]. Research in sports medicine,2010,18(3):176-187.

[8] HOFFMAN S E,PELTZ C D,HALADIK J A,et al. Dynamic in-vivo assessment of navicular drop while running in barefoot,minimalist,and motion control footwear conditions[J]. Gait & posture,2015,41(3):825-829.

[9] 洪友廉,王琳,周继和,等. 有鞋带跑鞋和松紧鞋舌跑鞋跑步主

观舒适度、足底压力和后足运动参数比较[J]. 中国运动医学杂志,2011,30(7):613-617.
HONG Youlian, WANG Lin, ZHOU Jihe, et al. Plantar pressure, comfort and rearfoot motion during running: comparison between laced running shoes and elastic-covered running shoes[J]. Chinese journal of sports medicine,2011,30(7):613-617(in Chinese).

[10] DAILY-DIAMOND C A, GREGG C E, O'REILLY O M. The roles of impact and inertia in the failure of a shoelace knot[J]. Proceedings of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences,2017,473(2200):20160770.

[11] 魏书涛,郭新宇,汤运启,等. 一种基于微型传感器的鞋带拉力测试系统研制及可靠性研究[J]. 医用生物力学,2023,38(1):164-169.
WEI Shutao, GUO Xinyu, TANG Yunqi, et al. Development of shoelace tensile test system based on micro-sensors and reliability study[J]. Journal of medical biomechanics,2023,38(1):164-169 (in Chinese).

[12] POLSTER B. What is the best way to lace your shoes? [J]. Nature,2002,420(6915):476.

[13] 叶靖怡,陈海荣,宋杨,等. 跑鞋纵向抗弯刚度调整对青少年下肢生物力学影响的研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):209-217.
YE Jingyi, CHEN Hairong, SONG Yang, et al. Effects of running shoes'increased longitudinal bending stiffness on lower limb biomechanics of adolescent runners[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):209-217(in Chinese).

[14] MYERS C A, ALLEN W, LAZ P J, et al. The impact of self-lacing technology on foot containment during dynamic cutting[J]. Footwear science,2022,14(2):94-102.

[15] BREINE B, MALCOLM P, FREDERICK E C, et al. Relationship between running speed and initial foot contact patterns[J]. Medicine & science in sports & exercise,2014,46(8):1595-1603.

[16] 明安华,何辉,杨帆,等. 跑速对男性大学生下肢关节负荷特征的影响[J]. 应用力学学报,2022,39(2):224-230.
MING Anhua, HE Hui, YANG Fan, et al. Effect of running speed on lower extremity joint load in male college students[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):224-230(in Chinese).

[17] CHANG R, RODRIGUES P A, VAN EMMERIK R E A, et al. Multi-segment foot kinematics and ground reaction forces during gait of individuals with plantar fasciitis[J]. Journal of biomechanics,2014,47(11):2571-2577.

[18] SERRIEN B, GOOSSENS M, BAEYENS J P. Statistical parametric mapping of biomechanical one-dimensional data with Bayesian inference[J]. International biomechanics,2019,6(1):9-18.

[19] ADELAAR R S. The practical biomechanics of running[J]. The american journal of sports medicine,1986,14(6):497-500.

[20] BORGIA B, FREEDMAN SILVERNAIL J, BECKER J. Joint coordination when running in minimalist, neutral, and ultra-cushioning shoes[J]. Journal of sports sciences,2020,38(8):855-862.

[21] COTTON F J. Foot statics and surgery[J]. New england journal of medicine,1936,214(8):353-362.

[22] LIEBERMAN D E, VENKADESAN M, WERBEL W A, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. Nature,2010,463(7280):531-535.

[23] 梅齐昌,顾耀东,李建设. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析[J]. 体育科学,2015(6):34-40.
MEI Qichang, GU Yaodong, LI Jianshe. A biomechanical analysis of running based on the foot morphological characteristics[J]. China sport science,2015(6):34-40(in Chinese).

[24] OUNPUU S. The biomechanics of walking and running[J]. Clinics in sports medicine,1994,13(4):843-863.

[25] 朱晓兰,杨辉. 我国青年田径运动员不同载荷下足部三维特征的研究[J]. 北京体育大学学报,2008,31(12):1649-1650,1670.
ZHU Xiaolan, YANG Hui. A study of Chinese junior athletes' foot 3-dimension features under different loads[J]. Journal of Beijing Sport University,2008,31(12):1649-1650,1670(in Chinese).

[26] WAGER J C, CHALLIS J H. Elastic energy within the human plantar aponeurosis contributes to arch shortening during the push-off phase of running[J]. Journal of biomechanics,2016,49(5):704-709.

[27] 董骧,樊瑜波,张明,等. 人体足部生物力学的研究[J]. 生物医学工程学杂志,2002,19(1):148-153.
DONG Xiang, FAN Yubo, ZHANG Ming, et al. Studies on biomechanics of human foot: a review[J]. Journal of biomedical engineering,2002,19(1):148-153(in Chinese).

[28] 李晓芸,冉诗雅,杨璐铭,等. 三种负重状态下青年女性的三维脚型数据对比分析[J]. 皮革科学与工程,2016,26(5):48-54.
LI Xiaoyun, RAN Shiya, YANG Luming, et al. Analysis of 3D foot morphology of young females under three weight-bearing conditions [J]. Leather science and engineering,2016,26(5):48-54(in Chinese).

[29] RODGERS M M. Dynamic foot biomechanics[J]. Journal of orthopaedic & sports physical therapy,1995,21(6):306-316.

[30] GRANT A D. Gait analysis: normal and pathological function[J]. Journal of sports science & medicine,2010,9(2):180-180.

[31] MARR S J, QUINE S. Shoe concerns and foot problems of wearers of safety footwear[J]. Occupational medicine,1993,43(2):73-77.

[32] HAGEN M, HENNIG E M. The influence of different shoe lacing conditions on plantar pressure distribution, shock attenuation and rearfoot motion in running[J]. Clinical biomechanics,2008,23(5):673-674.

[33] HAN J, WADDINGTON G, ANSON J, et al. Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability[J]. Journal of science and medicine in sport,2015,18(1):77-81.

(编辑 张璐)